干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

2005—2017年拉萨小时降水变化特征

多典洛珠[1,2]， 周顺武[1]， 郑 丹[1]， 王传辉[3]， 赤 曲[1,2]

（1 南京信息工程大学，江苏 南京 210044； 2 西藏自治区气象台，西藏 拉萨 850000；
3 安徽省气象局，安徽 合肥 230061）

摘 要：利用拉萨站2005—2017年汛期（5～9月）逐时地面观测资料，分析了拉萨逐年小时降水（降水量、降水频次和降水强度）的变化特征，结合谐波分析方法讨论了小时降水的日循环信号，最后对比了不同时长和等级的小时降水出现频次及其对总降水的贡献。结果表明：(1) 拉萨逐年汛期小时降水以"单峰型"结构为主，峰值出现在夜间。(2) 拉萨汛期小时降水变化为全日周期，其中盛夏（7～8月）期间的日循环信号最强。(3) 拉萨汛期降水按持续时间可分为：短历时（1～3 h）、中历时（4～6 h）和长历时（>6 h）3种类型，其中短（长）历时降水出现频次最多（少），但其贡献率最小（大），短历时降水的日峰值出现在下午到前半夜，而中历时和长历时降水的日峰值出现在后半夜。(4) 各等级小时降水中小雨（$3>r\geqslant1$）和中雨（$r\geqslant3$）对降水总量的贡献率明显大于微雨（$1>r\geqslant0.1$），随着降水等级的上升，夜雨概率增大。

关 键 词：小时降水；日变化；谐波分析；降水持续时间；降水等级

文章编号：

降水的日变化是气候系统最基本的变化模态之一，它以太阳辐射作为驱动力，受下垫面和地形强迫作用，对地球系统水循环和能量循环以及人类日常生活都有重要影响[1]，基于小时尺度的降水日变化的研究，可以更加准确地理解降水的形成机制和水汽循环区域特征[2-5]。中国大陆不同区域的降水日变化存在明显的差异[6]；而青藏高原（以下简称高原）、平原和海洋之间的降水日变化也不同[7]；高原中部地区逐时降水量峰值时间提前于其以东四川盆地，它们的日变化表现出从高原中部向外传播的特征[8]。这些研究表明，降水日变化存在明显的地域性差异。

随着遥感和自动化观测程度的提高，越来越多的研究关注中国各地小时降水的变化特征。分析台站逐时降水资料，发现江苏、广东等地逐时降水量日峰值以下午为主[9-10]；河南省区域平均逐时降水量峰值出现在早晨和傍晚[11]；而黑龙江降水频率最大值往往在下午和前半夜[12]；华南前后汛期的小时降水具有不同的日变化特征，前期呈现"双峰型"特点，后期以"单峰型"为主[13]。随着对小时降水认识的深入，有研究将小时降水按其持续时间和降水等级进行分类，雅安持续时间>6 h的降水对总降水的贡献率为80.4%，主要发生在17:00～04:00（北京时，下同）[14]，而塔克拉玛干沙漠腹地持续时间1～3 h降水的贡献率达到61.76%，最大降水量出现在23:00[15]；西安小时降水量>2 mm的贡献率大（61.5%），≤2 mm的贡献率小（38.5%）[16]。

拉萨地处雅鲁藏布江支流拉萨河中游河谷平原，属于典型的半干旱气候区，有研究指出拉萨一带是高原夜雨中心，也是降水日变化最显著的区域[17-18]。由于观测资料的限制，以往研究拉萨降水的变化基本是以季节尺度和年际尺度为主[19-20]，对小时降水的关注度很小，拉萨小时降水日变化的周期是什么？不同类型降水（不同持续时间和等级）的频次和贡献率如何？它们的日循环是否存在差异？这些问题都未涉及。由于拉萨汛期（5～9月）

收稿日期：2019-12-11； **修订日期：**2020-10-20
基金项目：国家自然科学基金项目（41175081，91337218，41605039）联合资助
作者简介：多典洛珠，男，日喀则人，硕士研究生，主要从事青藏高原气象研究. E-mail: ddlzh@qq.com
通讯作者：周顺武，教授，主要从事气候动力学研究. E-mail: zhou@nuist.edu.cn

降水占年降水总量的90%以上[21]，本文将围绕上述问题利用拉萨站汛期逐小时地面降水资料，揭示拉萨逐年汛期小时降水(降水量、降水频次以及降水强度)的日变化特征，采用谐波分析方法，定性和定量分析汛期各月降水的日循环(周期、位相和振幅)，最后根据降水持续时间和降水等级的分类，揭示拉萨汛期降水的主要结构及不同类型降水事件的逐小时演变规律。

1 资料与方法

1.1 资料来源

拉萨站属于国家基本观测站。文中所用的资料为该站2005—2017年逐小时降水量，该数据由西藏自治区气象信息中心提供，已经过严格的质量控制。

在对数据进行分析和处理时，如果小时降水量≥0.1 mm，就认为该小时有降水发生，小时降水量是研究时段内同时刻降水量的累积值；小时降水频次是研究时段内同时刻降水出现的次数；小时降水强度是小时降水量和频次的比值[22]；降水持续时间是指当某一次降水发生时次后连续2 h没有出现降水则定义为一次降水过程的结束，并将该降水过程开始至结束时刻的小时数定义为持续时间[23]；贡献率是指分析时段内不同类型降水的累积量占总降水量的百分比[24]。将每日24 h按西藏时区分成4个时段：上午(08:00～13:00)、下午(14:00～19:00)、前半夜(20:00～01:00)、后半夜(02:00～07:00)。

1.2 谐波分析方法

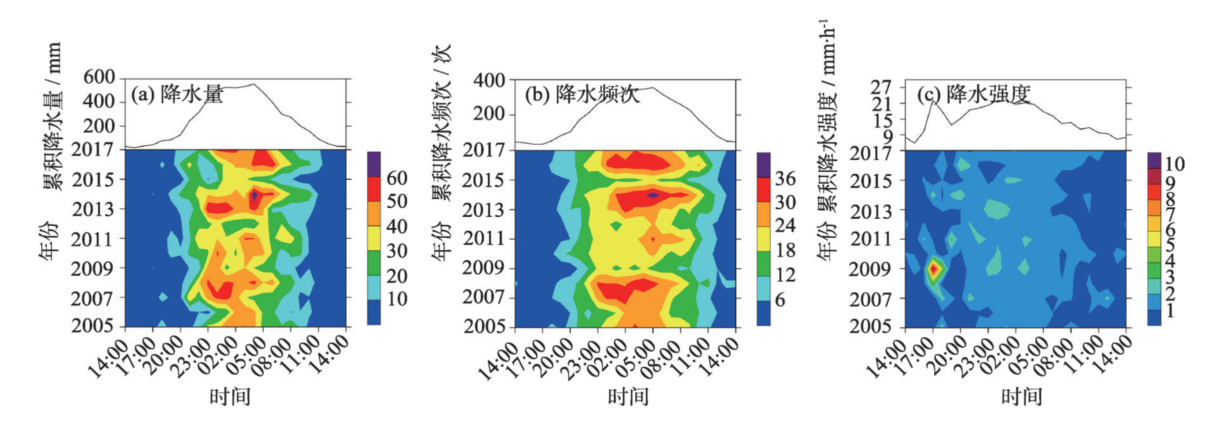
谐波分析可将基本周期为已知的周期现象分离出来，同时又能通过振幅和位相来加以定量描述，便于各种周期现象的差异分析和比较。利用该方法，分析拉萨逐月平均小时降水量、降水频次、降水强度的日变化特征，其公式如下：

$$y(t) = y_0 + \sum_{k=1}^{n} A_k \sin(\omega_k t + \sigma_k) = y_0 + \sum_{k=1}^{n} (a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t) \quad (1)$$

式中：$y(t)$表示t时刻某要素值；y_0为t时刻的日平均值；文中n取2，分别代表24 h和12 h的谐波；A_k为振幅；σ_k为位相；$\omega_k=2\pi k/N$为圆频率；N为样本量。另外，分解出来的谐波是否有统计意义需进行显著性检验，本文采用离散功率谱检验方法(F检验)对各个谐波进行显著性检验[25]。

2 小时降水日变化的基本特征

图1分别给出2005—2017年拉萨汛期小时降水量、降水频次和降水强度的逐年和多年累积值的日变化。由图1a可见，拉萨降水量日变化特征非常明显，降水主要集中在夜间，年平均夜间降量为425.3 mm，占日降水总量的84%，其中23:00～06:00是降水最多的时段，从多年累积曲线看，呈现“单峰型”结构分布，其中05:00出现了最高峰，最低值出现在15:00。从降水频次(图1b)上看，也呈现明显的昼少夜多的分布特征，其中年平均降水频次为293次，一年中77%的降水出现在夜间，0:00～08:00是频次最多的时段，多年累积日变化曲线为“单峰型”，降水频次最多的时间与降水量的峰值时间相



注：上方曲线分别为2005—2017年累积降水量、累积降水频次和累积降水强度

图1 拉萨2005—2017年逐年汛期小时降水量、降水频次和降水强度的分布

Fig. 1 Distribution of hourly cumulative precipitation, cumulative precipitation frequency and precipitation intensity during flood season in Lhasa from 2005 to 2007

同，为05:00，降水频次最少的时间是17:00。值得注意的是，近几年降水量和降水频次有所增多，且峰值出现的时间有向后半夜（03:00～07:00）推迟的趋势。从小时降水强度（图1c）日变化特征来看，多年累积曲线呈现"双峰型"结构，在下午和夜间出现了峰值，这是因为这些年在下午时段出现了短时强降水，但频次较少，出现降水强度大值，比如：图1c中2009年的17:00降水强度出现的极值是一次降水事件（2009年8月19日17:00 10.3 mm）造成的。根据统计，多年下午（15:00～19:00）出现的降水频次占总降水频次的5%，属于小概率事件，因此下午的峰值只能说明拉萨降水强度的异常情况，不能代表平均状况。

综合分析，拉萨降水呈现昼少夜多的分布特征且逐年小时降水量、降水频次和降水强度以"单峰型"结构为主。形成这种结构的原因与高原大气环流和拉萨独有的地形特征有关，高原大气环流具有显著的日变化，它是被太阳辐射日变化所驱动[26]，而拉萨位于河谷地带，环绕河谷的山脉海拔较高（约为5 000 m），白天由于谷底水体热容量较大，增温幅度明显小于其两侧山坡，近地层大气较稳定，不易产生降水；夜间由于山坡处地表长波辐射冷却比水体大，山坡近地层的冷空气沿坡体下移到谷底时将河谷附近的暖湿气流抬升冷却凝结致雨，从而导致夜雨的发生[17]，因此，拉萨降水的"单峰型"正是在这样的天气背景下产生的。

3 小时降水的谐波分析结果

3.1 小时降水量的谐波分析结果

为了进一步分析拉萨逐月降水日变化的周期信号及强弱，对拉萨汛期逐月小时降水量进行13 a的算术平均，并采用谐波分析方法提取各自的主要波动。表1可以看出，各月日循环的方差贡献率均通过0.01的显著性检验，平均达到89.4%，而半日循环的方差贡献率均非常小，平均只有5.4%，说明拉萨小时降水量以全日周期为主。各月中夏季（6～8月）的方差贡献率明显大于其他月份，其中8月方差贡献率最大，5月最小，从振幅上看，夏季的平均振幅（5.6 mm）也明显高出整个汛期的平均振幅（4.2 mm）。

图2给出了逐月小时降水量的原始序列（实线）和日循环曲线（虚线）的变化情况。由图可见，各月小时降水量的日变化均呈"单峰型"分布，其中小时降水量最大的月份是7月，峰值达到15.8 mm，出现在01:00，最小的月份是5月，只有3.9 mm，出现在03:00，日循环曲线能较好的拟合各月小时降水量的变化。

表1 汛期各月平均小时降水量的谐波分析结果

Tab. 1 Harmonic analysis results of the average hourly precipitation in each month of the flood season

月份	第一波（24 h周期）			第二波（12 h周期）		
	S/%	*A*/mm	*σ*	*S*/%	*A*/mm	*σ*
5月	82*	1.4	03:00	11.5	0.5	03:00
6月	91.2*	4.2	03:00	4.8	1	04:00
7月	91.1*	6.8	03:00	5.9	1.7	01:00
8月	94.5*	5.9	02:00	2	0.9	00:00
9月	88.1*	2.5	03:00	3	0.5	03:00

注：*S*为方差贡献率，*A*为振幅，*σ*为达到第一个峰值的时间，*表示通过0.01的显著水平

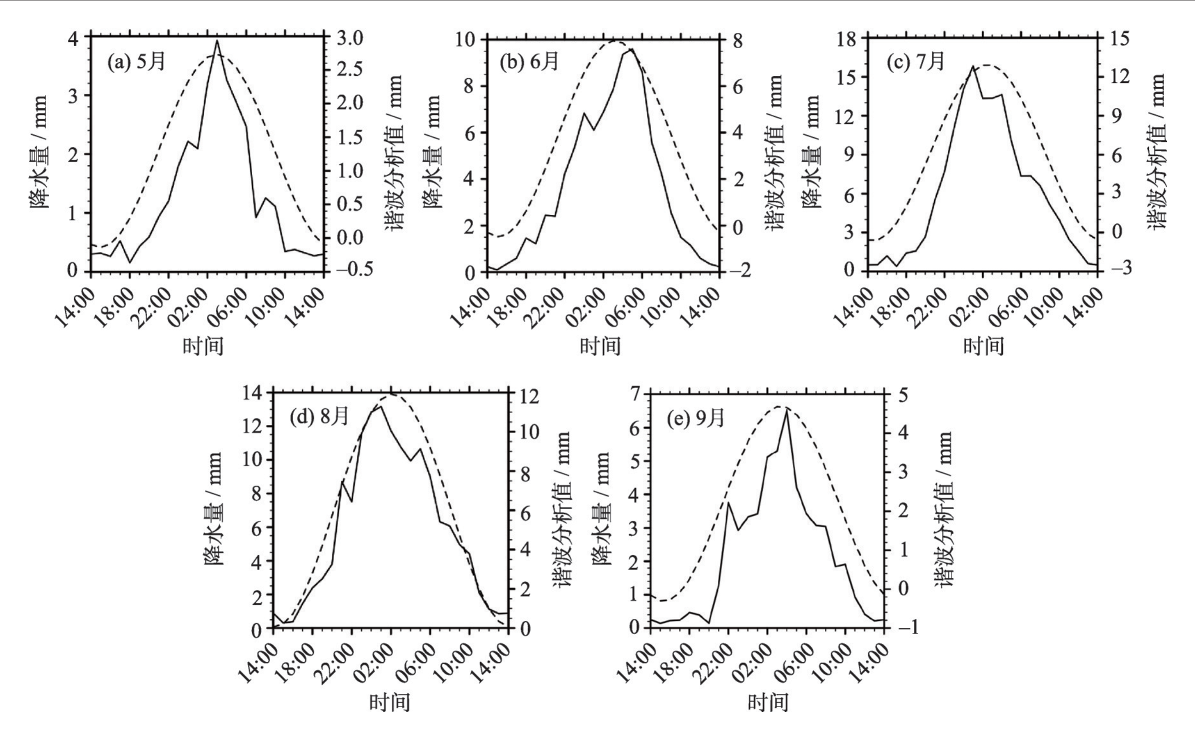
3.2 小时降水频次谐波分析结果

用同样的方法对拉萨汛期逐月小时降水频次进行分析。根据表2所示，全日周期信号占有绝对优势，方差贡献率均通过0.01的显著性检验，平均达到了96.2%，其中盛夏（7～8月）的方差贡献率最大，两个月均达到98.5%，初夏5月的方差贡献率仍然最小，从振幅上看，盛夏期间的平均振幅（3.8次）明显大于整个汛期平均值（2.5次），说明，降水越多的月份小时降水的变化幅度越大。

图3展示了逐月小时降水频次日变化（实线）和日循环曲线（虚线）的拟合情况，可以看出，小时降水频次的"单峰型"结构非常明显，峰值出现的时间逐月呈现超前和滞后的交替变化特点，主要出现在0:00～05:00之间，第一波也能较好的拟合各月小时降水频次的演变特征，波峰和波谷的走向均较为一致。

3.3 小时降水强度谐波分析结果

根据小时降水强度的谐波分析结果（表3），各月的方差贡献率总体来看明显低于小时降水量和小时降水频次的方差贡献率，平均为56.6%，除7月达到73.4%之外，5月和6月均在50%以下，即便如此，各月日循环的方差贡献率仍然能通过0.01的显著性检验，而半日循环的方差贡献率在5月和6月达到了15%以上，其他月份均在4%以下，说明拉萨小时降水强度的日变化仍然以全日循环信号为主，



注:图中实线为原始序列的日变化曲线,虚线为谐波分析第一波的合成曲线

图2　拉萨2005—2017年逐月平均小时降水量的演变及日循环曲线

Fig. 2　Evolution and harmonic analysis of the average monthly precipitation in Lhasa from 2005 to 2017

表2　汛期各月平均小时降水频次的谐波分析结果

Tab. 2　Harmonic analysis results of the average hourly precipitation frequency in each month of the flood season

月份	第一波(24 h周期)			第二波(12 h周期)		
	S/%	*A*/次	*σ*	*S*/%	*A*/次	*σ*
5月	91.5*	1	03:00	0.9	0.1	03:00
6月	96.5*	2.2	04:00	0.3	0.1	08:00
7月	98.5*	3.9	04:00	0.2	0.2	01:00
8月	98.5*	3.7	04:00	0.2	0.1	10:00
9月	95.8*	1.8	04:00	0.1	0.1	04:00

注:*S*为方差贡献率,*A*为振幅,*σ*为达到第一个峰值的时间,*表示通过0.01的显著水平

其中初夏带有半日循环信号但不显著。

图4刻画了拉萨平均逐月小时降水强度的日变化(实线)及第一个谐波拟合曲线(虚线),由图可见,拉萨小时降水强度的日变化波动频繁,其中5月和7月为“单峰型”,峰值分别出现在03:00时和01:00时,其余月份呈现17:00~18:00和01:00~04:00的“双峰型”分布,各月中拟合效果最好的是7月份。

总体来看,拉萨近13 a逐月小时降水日变化以全日循环信号为主,其中盛夏期间的日循环信号最强,振幅最大。拉萨位于东—西走向为主的山间盆地河谷地带,类似半开口地形,已有研究指出在半开口地形午后积雨云的形成与大气水汽含量的日变化密切相关,水汽达到日最大值的时间早(晚),积雨云形成时间就早(晚)[27];梁宏等[28]分析指出拉萨大气水汽含量的日循环信号在夏季最强,日变化幅度也最大。因此,在拉萨独特地形和大气水汽含量的共同作用下形成了盛夏降水日循环的强信号和稳定结构。

4　不同持续时间小时降水变化特征

4.1　不同持续时间降水事件的频次及贡献率

一般情况下,降水持续性是分离稳定性和不稳定性降水的关键因子[29]。由于拉萨近13 a持续时间1~15 h的降水累积降水量占降水总量的98%,因此,本文主要对持续时间1~15 h的降水进行分析。图5给出拉萨汛期不同持续时间降水出现的频次和降水贡献率,如图所示,降水频次(实线)随着持续时间的增加而下降,特别是持续时间在1~3 h的频次下降幅度非常大,超过3 h以后下降幅度变小,而贡献率(虚线)的变化则波动较大,随着持续时间的增加先升后降。整体上看持续1 h的降水最易出现(406次),持续15 h的降水出现次数最少(3

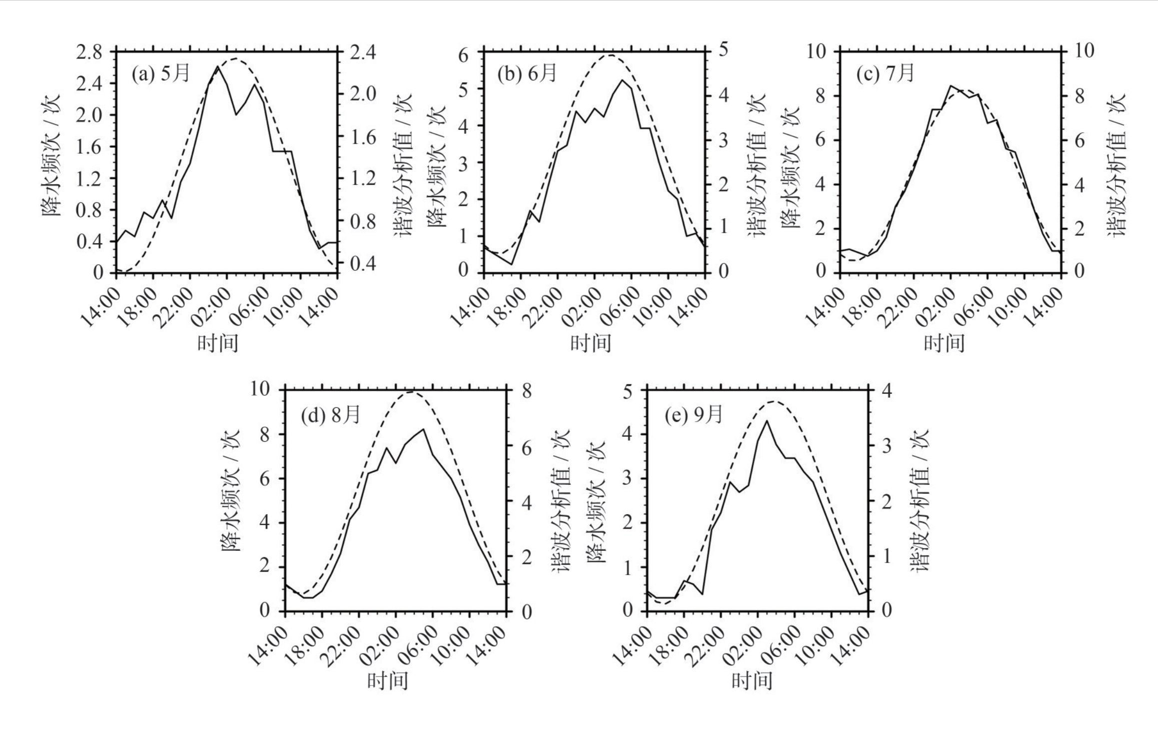


图3　拉萨2005—2017年逐月平均小时降水频次的演变及日循环曲线

Fig. 3　Evolution and harmonic analysis of the average monthly precipitation frequency in Lhasa from 2005 to 2017

表3　汛期各月平均小时降水强度的谐波分析结果

Tab. 3　Harmonic analysis results of the average hourly precipitation intensity in each month of the flood season

月份	24 h周期			12 h周期		
	S/%	A/mm·h^{-1}	σ	S/%	A/mm·h^{-1}	σ
5月	46.2*	0.4	03:00	16.4	0.2	03:00
6月	43.2*	0.6	01:00	19.3	0.4	06:00
7月	73.4*	0.6	01:00	3.9	0.1	12:00
8月	55.7*	0.6	23:00	6.7	0.2	07:00
9月	64.3*	0.4	03:00	1.3	0.1	02:00

注：S为方差贡献率，A为振幅，σ为达到第一个峰值的时间，*表示通过0.01的显著水平

次），贡献率最高的是持续4 h的降水（10.7%），贡献率最低的是持续15 h的降水（1%）。

将上述不同持续时间的降水事件归纳为3种类型：短历时（1～3 h）、中历时（4～6 h）和长历时（＞6 h）[30]，发现在3种类型中短历时降水的累积频次最多（803次），而贡献率最低（20.5%）；中历时降水的累积频次和贡献率均次之；长历时降水的累积频次最少（212次），但贡献率为最大（51.7%）。

4.2　不同持续时间降水事件的日变化特征

进一步分析拉萨不同持续时间降水的日变化。图6给出了2005—2017年拉萨小时降水量和降水频次随降水持续时间变化的剖面图，可以看出不同持续时间的日变化差异明显，从小时降水量来看（图6a），短历时降水的大值区出现在17:00～0:00，其中持续时间2 h的降水峰值达到了55.1 mm，出现在18:00时，中历时和长历时降水的大值区则出现在02:00～06:00，两个时段相差6 h左右。从小时降水频次上看（图6b），短历时降水的频次大值区出现在21:00～01:00，中历时降水频次的峰值出现在02:00～04:00，长历时降水的峰值则出现在03:00～06:00，三者呈现"阶梯式"分布。

综上分析，随着降水持续时间的增加，小时降水的峰值时间由下午推迟到了后半夜，其中，短历时降水最易出现在下午到前半夜，而中历时和长历时降水主要集中在后半夜。

5　不同等级小时降水变化特征

5.1　不同等级小时降水频次及贡献率

根据小时降水量的多少将拉萨小时降水划分为3个等级[31]，表4给出了各自的标准、出现频次和贡献率，可以看出近13 a的3个等级降水中微雨的频次最多，达到小雨的2倍，中雨的4倍，但是其对降水总量的贡献率最小，相反，小雨和中雨虽然频次少，但是贡献率明显大于微雨，说明，拉萨降水总量主要是由小雨和微雨累积而成的，两者的累积贡

图4　拉萨2005—2017年逐月平均小时降水强度的演变及日循环曲线

Fig. 4　Evolution and harmonic analysis of the average monthly precipitation intensity in Lhasa from 2005 to 2017

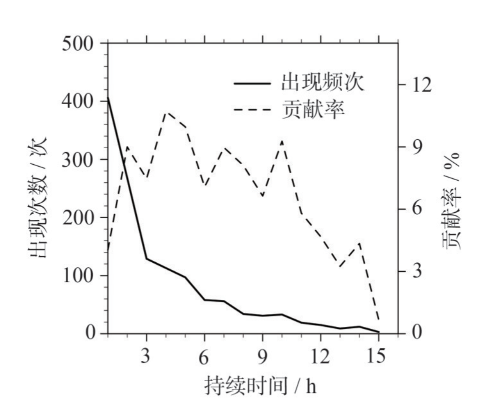


图5　拉萨2005—2017年汛期不同降水持续时间出现的累积频次、贡献率

Fig. 5　Cumulative frequency, contribution rate of different precipitation durations during flood season in Lhasa from 2005 to 2017

献率达到84.4%。微雨虽然最容易出现，但其对降水总量的贡献率最小，而中雨出现频次最少，但贡献率最高。

5.2　不同等级小时降水的日变化特征

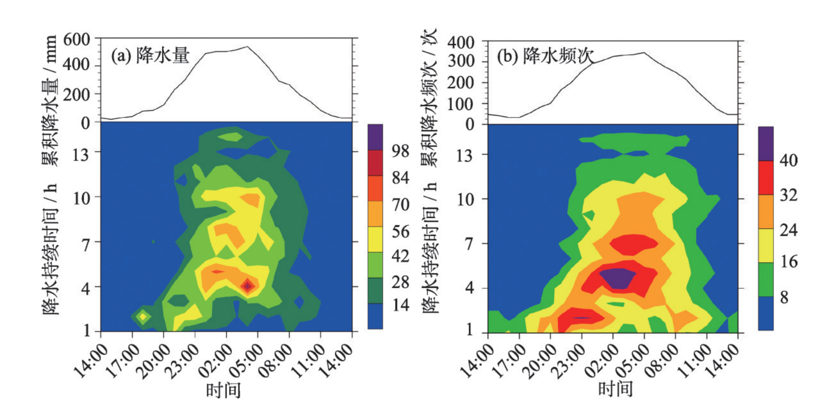
图7展示了汛期不同等级小时降水量的日变化，可以看出，不同等级的降水量的日变化差异明显，微雨的小时降水量出现时间较为分散，呈现"多峰型"特点，峰值出现的时间在23:00～08:00，小雨的日变化曲线为"单峰型"，峰值出现在05:00左右，降水强度最大的中雨有两个峰值，一般出现在0:00和04:00，结合第2小结中的分析，可以看出小时降水总量的日变化位相与小雨和中雨的日变化位相基本一致，再次说明了拉萨汛期小雨和中雨对降水总量的日变化具有较大的贡献。

图8为不同等级降水事件的降水频次日变化，虽然各等级降水均呈现明显的夜雨特征，但不同强度的降水的出现时间不同，微雨出现的时间为20:00～次日11:00，小雨和中雨出现时间明显短于微雨，两者的高值区分别出现在0:00～08:00之间和23:00～05:00之间，微雨的夜雨概率（夜雨频次占总频次的比例）为70%，小雨和中雨分别为80%和90%，说明，强降水更容易在夜间出现，这个结论与余忠水[32]在夜雨分析中得出的拉萨夜雨率随着降水量增加而明显增大一致。

总之，拉萨近13 a小雨和中雨日变化对降水总量的贡献率明显大于微雨且随着降水等级的上升夜雨概率增大。

6　结论和讨论

利用拉萨2005—2017年汛期逐小时降水资料分析了逐年汛期小时降水（降水量、降水频次以及降水强度）的日变化特征并讨论了逐月日循环信号的强弱，此外，利用降水持续时间和降水等级分析了不同类型降水事件的频次和贡献率，得出以下主



注：上方曲线分别为2005—2017年累积降水量和累积降水频次

图6 拉萨2005—2017年汛期不同持续时间的小时累积降水量和累积降水频次的分布

Fig. 6 Distribution of hourly cumulative precipitation and cumulative precipitation frequency in different durations of Lhasa from 2005 to 2007

表4 2005—2017年汛期不同等级降水的13 a累积频次、贡献率

Tab. 4 13 a cumulative frequency and contribution rate of different levels of precipitation in flood season from 2005 to 2017

降水等级	分类标准/mm	累积出现频次/次	贡献率/%
微雨	$1 > r \geqslant 0.1$	2 771	15.6
小雨	$3 > r \geqslant 1$	1 206	34.7
中雨	$r \geqslant 3$	602	49.7

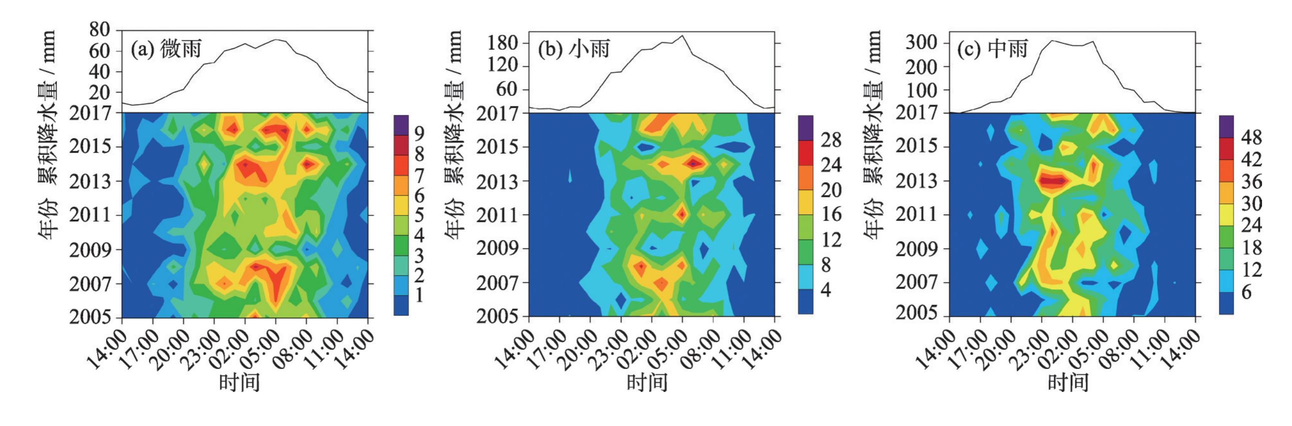
要结论：

（1）拉萨汛期逐年小时降水量、降水频次和降水强度的日变化以"单峰型"为主，前两者峰值一般出现在后半夜，后者峰值出现在前半夜，谷值均出现在下午。

（2）全日循环是各月降水日变化的主要周期信号，方差贡献率均通过了0.01的显著性检验，其中降水频次的平均方差贡献率最高，达到了96.2%，在各月中盛夏期间的日循环信号最强，振幅也最大，特别是盛夏降水频次的方差贡献率平均达到98.5%。

（3）近13 a拉萨短历时（1～3 h）降水出现频次最多，贡献率最低，长历时（>6 h）降水出现频次最少，贡献率最高，短历时降水的日峰值出现在下午到前半夜，而中历时和长历时降水的日峰值出现在后半夜。

（4）在拉萨不同等级小时降水中，微雨的降水频次最多，但贡献率最小，中雨的频次最少，但是贡献率最大；微雨的日变化峰值时间较为分散，主要出现在下午到次日上午，小雨和中雨集中在夜间，降水等级越高夜雨概率越大。



注：上方曲线分别为2005—2017年不同等级降水的累积降水量

图7 拉萨2005—2017年汛期不同等级降水的小时累积降水量分布

Fig. 7 Distribution of hourly cumulative precipitation of different levels precipitation during flood season from 2005 to 2017 in Lhasa

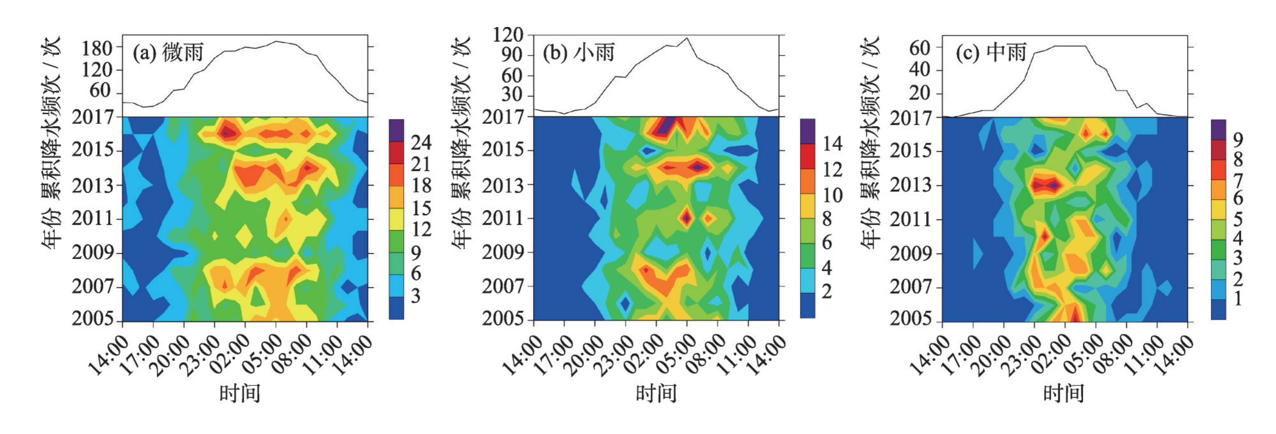


图8 拉萨2005—2017年汛期不同等级降水的小时累积降水频次分布

Fig. 8 Distribution of hourly cumulative precipitation of different levels precipitation frequency during flood season from 2005 to 2017 in Lhasa

本文利用近13 a拉萨小时降水资料，分析了逐年小时降水的日变化特征和逐月周期信号强弱，对比了不同类型（不同持续时间和等级）降水事件的出现频次和贡献率以及它们的日变化差异，获得了拉萨地区小时降水变化特征的一些新的认识，对深入了解高原半干旱地区降水日变化具有一定的参考意义。但限于所用研究资料的年限较短，难以揭示汛期小时降水的长期变化趋势，另外，高原地形复杂，关于拉萨小时降水特征分析的相关结论是否也适用于其他区域需要在今后的工作中进行验证。

参考文献（References）

[1] 宇如聪, 李建, 陈昊明, 等. 中国大陆降水日变化研究进展[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 948-968. [YU Rucong, LI Jian, CHEN Haoming, et al. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(5): 948-968.]

[2] ZHENG Y G, GONG Y D, CHEN J. Warm-season diurnal variations of total, stratiform, convective, and extreme hourly precipitation over central and eastern China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(2): 143-159.

[3] YUN F F, XIAO P, YUAN J, et al. Climatological characteristics of summer precipitation over East Asia measured by TRMM PR: A review[J]. J Meteor Res, 2017, 31(1), 142-159.

[4] GAN Y T, LI N N, LI J. Differences in the rainfall characteristics between Mount Tai and its surrounding areas[J]. J Meteor Res, 2019, 33(5): 976-988.

[5] PAN H, CHEN G X. Diurnal variations of precipitation over north China regulated by the mountain-plains solenoid and boundary-layer inertial oscillation[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(8): 863-884.

[6] 宇如聪, 李建. 中国大陆日降水峰值时间位相的区域特征分析[J]. 气象学报, 2016, 74(1): 18-30. [YU Rucong, LI Jian. Regional characteristics of diurnal peak phases of precipitation over contiguous China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2016, 74(1): 18-30.]

[7] 胡亮, 杨松, 李耀东. 青藏高原及其下游地区降水厚度季、日变化的气候特征分析[J]. 大气科学, 2010, 34(2): 387-398. [HU Liang, YANG Song, LI Yaodong. Diurnal and seasonal climatology of precipitation depth over Tibetan Plateau and its downstream regions[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(2): 387-398.]

[8] 白爱娟, 刘晓东, 刘长海, 等. 青藏高原与四川盆地夏季降水日变化的对比分析[J]. 高原气象, 2011, 30(4): 852-859. [BAI Aijuan, LIU Xiao dong, LIU Changhai, et al. Contrast of diurnal variations of summer precipitation between the Tibetan Plateau and Sichuan Basin[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(4): 852-859.]

[9] 费启瑶, 杨建全, 阿不都外力·阿不力克木, 等. 江苏南部汛期降水日变化特征分析[J]. 气象科学, 2014, 34(6): 678-683. [FEI Qili, YANG Jianquan, ABULIKEMU Abuduwaili, et al. Characteristics analysis on diurnal variation of precipitation in flood season of southern Jiangsu[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2014, 34(6): 678-683.]

[10] 伍红雨, 李春梅, 刘蔚琴. 1961—2014年广东汛期小时强降水的日变化特征[J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2018, 57(5): 10-18. [WU Hongyu, LI Chunmei, LIU Weiqin. The characteristics of diurnal variations of hourly heavy precipitation in flood seasons in Guangdong during 1961—2014[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyateni, 2018, 57(5): 10-18.]

[11] 王新伟, 杜明哲, 肖瑶. 河南省汛期降水的日变化特征[J]. 干旱气象, 2018, 36(3): 383-389. [WANG Xinwei, DU Mingzhe, XIAO Yao. Diurnal variations of precipitation in flood season of Henan Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(3): 383-389.]

[12] 张洪玲, 尹嫦娇, 魏磊, 等. 黑龙江省汛期逐时降水的时空变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1258-1263. [ZHANG Hongling, YIN Changjiao, WEI Lei, et al. Temporal and spatial variations of hourly precipitation in Heilongjiang Province in the flood

season[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1258-1263.]

[13] 李德帅. 基于逐小时资料的华南地区汛期降水时空变化特征及其成因研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016. [LI Deshuai. Research on the spatiotemporal characteristics of hourly precipitation over south China during the warm season and its possible causes[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.]

[14] 周长艳, 肖安, 高文良. 2004—2013年“雨城”雅安的降水日变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(6): 1524-1533. [ZHOU Changyan, XIAO An, GAO Wenliang. Analysis of the diurnal variation features of precipitation in Ya'an as the rainy city, 2004—2013[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(6): 1524-1533.]

[15] 周雪英, 贾健, 刘国强. 1997—2017年塔克拉玛干沙漠腹地降水特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 187-194. [ZHOU Xueying, JIA Jian, LIU Guoqiang. Characteristics of precipitation at hinterland of Taklimakan Desert during 1997—2017[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(1): 187-194.]

[16] 孙娴, 魏娜, 王式功, 等. 西安夏季降水的日变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1176-1182. [SUN Xian, WEI Na, WANG Shigong, et al. Study of the daily variation of summer precipitation in Xi'an[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1176-1182.]

[17] 余忠水, 康世昌, 蒋建莹. 青藏高原夏季夜雨率空间分布及其变化特征[J]. 山地学报, 2011, 29(5): 627-632. [YU Zhongshui, KANG Shichang, JIANG Jianying. Spatial and temporal variations of the night-rain rate during summer over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(5): 627-632.]

[18] 列杰班宗, 罗布, 王伟. 西藏地区气象自动站夏季逐时降水资料特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(2): 77-80. [LIE Jiebanzong, LUO Bu, WANG Wei. Analysis on hourly variation of precipitation in Tibet[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2012, 32(2): 77-80.]

[19] 尼玛吉, 杨勇, 次珍, 等. 1981—2010年拉萨市降水特征分析[J]. 中国农学通报, 2014, 30(17): 262-266. [NI Maji, YANG Yong, CI Zhen, et al. Analysis on change characteristics of precipitation in Lhasa from 1981 to 2010[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(17): 262-266.]

[20] 罗布, 智海, 索朗塔杰, 等. 印度洋偶极子中的西极子对西藏高原盛夏降水的影响[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 909-919. [LUO Bu, ZHI Hai, SUO Langtajie, et al. Interannual variability of midsummer precipitation over Tibet Plateau associated with the western pole of Indian Ocean Dipole[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 909-919.]

[21] 周顺武, 王传辉, 杜军, 等. 青藏高原汛期降水的时空分布特征[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(6): 723-732. [ZHOU Shunwu, WANG Chuanhui, DU Jun, et al. Characteristics of spatial and temporal distribution of precipitation in flood season over the Tibetan Plateau[J]. Climatic and Environmental Research, 2011, 16(6): 723-732.]

[22] 张宏芳, 李建科, 潘留杰, 等. 陕西暖季降水的日变化特征及南北差异[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 889-898. [ZHANG Hongfang, LI Jianke, PAN Liujie, et al. Diurnal variation characteristics and north-south differences of precipitation in warm season in Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 889-898.]

[23] 黄秋霞, 赵勇, 何清, 等. 伊宁市主汛期降水日变化特征[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 742-747. [HUANG Qiuxia, ZHAO Yong, HE Qing, et al. Daily variations characteristics of rainfall in flood season in Yining City[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4): 742-747.]

[24] 郑博华, 陈胜, 吕新生. 喀什地区降水(雨雪)的日变化特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1) : 108-116. [ZHENG Bohua, CHEN Sheng, LYU Xinsheng. Interdiurnal variation characteristics of precipitation (rain and snow) in Kashi Prefecture[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 108-116.

[25] 丁裕国, 江志红. 气象数据时间序列信号处理[M]. 北京气象出版社, 2002: 32-37. [DING Yuguo, JIANG Zhihong. The signal processing of time series of meteorological data[M]. Beijing Meteorological Press, 2002: 32-37.]

[26] 刘新, 王军, 吴国雄, 等. 欧亚地形对夏季南亚大气环流日变化影响的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2007, 31(3): 389-399. [LIU Xin, WANG Jun, WU Guoxiong, et al. Numerical modeling of the influence of Eurasian orography on the diurnal change of summer atmospheric circulation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(3): 389-399.]

[27] IWASAKI H, MIKI T. Diurnal variation of convective activity and precipitable water over the "semi-basin": Preliminary study on the mechanism responsible for the evening convective activity maximum[J] J Meteor Soc Japan, 2002, 80(3): 439-450.

[28] 梁宏, 刘晶淼, 张人禾, 等. 拉萨河谷大气水汽日变化特征[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 335-342. [LIANG Hong, LIU Jingmiao, ZHANG Renhe, et al. Diurnal variations of atmospheric water vapor in Lhasa River valley[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 335-342.]

[29] YU R C, ZHOU T J, XIONG A Y, et al. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China[J]. Geophys Res Lett, 2007, 34(1): 223-234.

[30] 计晓龙, 吴昊旻, 黄安宁, 等. 青藏高原夏季降水日变化特征分析[J]. 高原气象, 2017, 36(5): 1188-1200. [JI Xiaolong, WU Haomin, HUANG Anning, et al. Characteristics of the precipitation diurnal variation over Qinghai-Tibetan Plateau in summer[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(5): 1188-1200.]

[31] 沈志强, 卢杰, 华敏, 等. 西藏拉萨达孜夏季降水日变化特征[J]. 山地学报, 2016, 34(4): 409-414. [SHEN Zhiqiang, LU Jie, HUA Min, et al. Diurnal variation of precipitation in summer in Dazi County of Tibet[J]. Mountain Research, 2016, 34(4): 409-414.]

[32] 余忠水. 1955—2007年拉萨市雨季夜雨率变化特征[J]. 气象, 2011, 37(12): 1584-1588. [YU Zhongshui. The night rain rate variations of Lhasa in rainy season during 1955—2007[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(12): 1584-1588.]

Characteristics of hourly precipitation in Lhasa during 2005—2017

Duodianluozhu[1,2], ZHOU Shun-wu[1], ZHENG Dan[1], WANG Chuan-hui[3], CHI Qu[1,2]

(1 *Nanjing University of Information Science &Technology, Nanjing* 210044, *Jiangsu, China;*

2 *Meteorological Observatory of Tibet Autonomous Region, Lhasa* 850000, *Tibet, China;*

3 *Anhui Provincial Meteorological Bureau, Hefei* 230061, *Anhui, China*)

Abstract: Based on the hourly ground observation data of Lhasa station, Tibet, China during flood season (May to September) from 2005 to 2017, the variation characteristics of annual hourly precipitation (total, frequency, and intensity of precipitation) at the station are analyzed, discussing the daily cycle signal of hourly precipitation with harmonic analysis method. The frequency of hourly precipitation and its contribution to total precipitation are compared finally for different durations and grades. Results show that: (1) The diurnal variations of annual hourly precipitation in Lhasa are characterized by a "single peak" distribution, which appears at night. (2) The changes of hourly precipitation in Lhasa during the flood season is a full-day cycle, and the daily cycle signal is the strongest during midsummer (July to August). (3) According to the duration, the flood season in Lhasa can be divided into three types: short duration (1−3 h), medium duration (4−6 h), and long duration (>6 h), in which the short (long) duration of precipitation occurs most frequently (less), but its contribution rate is the smallest (large). Moreover, the daily peak value of short-term precipitation occurs in the afternoon to the middle of the night, while the daily peak value of mid-and long-term precipitation occurs in the second half of the night. (4) The contribution rate of light rain ($1 \leqslant r < 3$) and moderate rain ($r \geqslant 3$) to the total precipitation is significantly greater than that of the light rain ($0.1 \leqslant r < 1$). As precipitation levels rise, the probability of night rain increases.

Key words: hourly precipitation; diurnal variation; harmonic analysis; precipitation duration; precipitation level